

УДК 631.43

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОЧВЫ И СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ НА НЕЕ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ТЕХНИКИ

*В.В. Сироткин, В.М. Сироткин*

### Аннотация

Разработан метод оценки энергетического состояния почвы и степени механического воздействия на нее почвообрабатывающих машин на основе единого интегрального параметра, определяемого экспериментально-расчетно на основе измерения общепринятых величин: удельной поверхности твердой фазы, удельной поверхности конденсированной фазы, коэффициента влагопроводности, пористости, влажности, потенциала почвенной влаги.

**Ключевые слова:** удельная поверхность твердой фазы, удельная поверхность конденсированной фазы, коэффициент влагопроводности, пористость, влажность, потенциал почвенной влаги.

### Введение

Известные способы оценки состояния почвы и степени воздействия на нее по измерениям твердости, по изменению объемной массы и основной гидрофизической характеристики (ОГХ) имеют недостатки связанные, в основном с длительностью эксперимента построения зависимости между потенциалом влаги и влажностью почвы (ОГХ) и с погрешностями при определении общепринятых характеристик почвы.

### Метод

С целью сокращения времени эксперимента для определения большинства общепринятых характеристик почвы предлагается использовать аэродинамический метод, предусматривающий последующий перерасчет аэродинамических параметров в гидродинамические на основе теории подобия.

Рассматривая образец правильной геометрической формы, например цилиндрической, можно утверждать, что суммарный объем пор интерпретируется как объем одной цилиндрической поры эквивалентного радиуса, площадь сечения которой равна суммарной площади всех пор образца:

$$P = \frac{V_p}{V_s} = \frac{\pi \cdot R_{eq}^2 \cdot \Delta x}{\pi \cdot R_s^2 \cdot \Delta x} = \frac{R_{eq}^2}{R_s^2}, \quad (1)$$

где  $V_p$  – объем пар, м<sup>3</sup>;  $V_s$  – объем образца, м<sup>3</sup>;  $\Delta x$  – длина образца, м;  $R_s$  – радиус образца, м;  $R_{eq}$  – эквивалентный радиус, м (см. рис. 1).

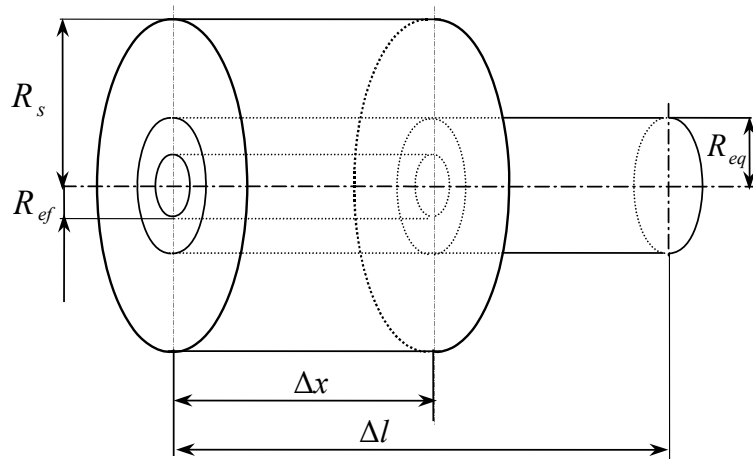


Рис. 1. Идеализированная модель образца почвогрунта

Боковая поверхность эквивалентной трубки тока равна поверхности конденсированной фазы образца. Отношение площади этой поверхности к объему конденсированной фазы  $V_{cf}$ ,  $\text{м}^3$  есть ее удельная поверхность  $\Omega_{cf}$ ,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ :

$$\Omega_{cf} = \frac{2R_{eq} \cdot \pi \cdot \Delta l}{V_{cf}}, \quad (2)$$

где длина  $\Delta l$  трубки тока эквивалентного радиуса определяется экспериментально, исходя из того, что при протекании газа через образец за счет разности давлений между его торцами поток теряет часть своей кинетической энергии на преодоление трения о поверхность конденсированной фазы. Из теории подобия следует, что в нашем случае потери энергии на трение сравнимы с кинетической энергией самого потока, то есть поток описывается уравнением Пуазейля [1]:

$$Q = \frac{\pi}{8\eta} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta l} R_{ef}^4, \quad (3)$$

где  $Q$  – объемный расход газа,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\frac{\Delta p}{\Delta l}$  – градиент давления,  $\text{кг}/\text{с}^2 \cdot \text{м}^2$ ;  $\eta$  – динамическая вязкость газа,  $\text{кг}/\text{с} \cdot \text{м}$ ;  $R_{ef}$  – эффективный радиус, м (см. рис. 1). Выражая  $R_{eq}$  из уравнения (1), запишем для конденсированной фазы:

$$\Omega_{cf} = \frac{2R_s \pi \Delta l}{V_s} \cdot \frac{\sqrt{P}}{(1-P)}. \quad (4)$$

Удельная поверхность твердой фазы, то есть сухого образца, определяется выражением

$$\Omega_0 = \frac{2R_s \pi \Delta l_0}{V_s} \cdot \frac{\sqrt{P_0}}{(1-P_0)}. \quad (5)$$

С величиной удельной поверхности тесно связан потенциал почвенной влаги, определяемой как энергия, необходимая для переноса единицы массы

жидкости из образца в свободную жидкость и выражаемая обычно через эквивалентное давление. Для почвы или другого пористого материала можно записать:

$$\Psi = \Psi' + \Psi'', \quad (6)$$

где  $\Psi$  – полный потенциал, Дж/кг, или Па (для воды);  $\Psi'$  – адсорбционный потенциал, отражающий влияние твердой фазы (матрицы) на понижение свободной энергии воды в образце;  $\Psi''$  – капиллярный потенциал, определяемый вкладом поверхностной энергии на границе раздела жидкость – газ.

Эквивалентное давление, отражающее адсорбционный потенциал, можно найти по формуле Б.В. Дерягина [1, с. 147]:

$$\Delta p' = A/h^3, \quad (7)$$

где  $A$  – постоянная, меняющаяся в пределах  $(5 \cdot 10^{-21} - 5 \cdot 10^{-19})$  Дж.

Определяя  $h$  по уравнению Б.Н. Мичурина [2]:

$$h = W_v / \Omega, \quad (8)$$

где  $W_v$  – объемная влажность образца, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $\Omega$  – удельная поверхность, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $h$  – толщина водной плёнки, м, можно записать:

$$\Delta p' = \frac{A\Omega_0^3}{W_v^3}, \quad \text{или} \quad \Psi' = \frac{\Delta p}{\rho_w} = \frac{A\Omega_0^3}{\rho_w W_v^3}, \quad (9)$$

где  $\rho_w$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

Величина  $\Psi''$  определяется с помощью выражения

$$\Psi'' = \frac{\Omega_{cf} \sigma_{lg}}{\rho_w}, \quad (10)$$

где  $\sigma_{lg}$  – удельная свободная поверхностная энергия на границе раздела жидкость – газ, Дж/м<sup>2</sup>.

Выделяя из (4) и (5) постоянной сомножитель и приравнявая правые части, можно записать

$$\frac{\Omega_i(1-P_i)}{\Delta l_i \sqrt{P_i}} = \frac{\Omega_0(1-P_0)}{\Delta l_0 \sqrt{P_0}}, \quad (11)$$

где индекс  $i$  относится к любому промежуточному значению величины при объемной влажности в пределах от 0 до  $W = P_0$ ; с учетом (1) уравнение (11) может быть записано в виде

$$\Omega_0 = \frac{\Omega_i(1-P_i)P_0^2 \sqrt{P_0}}{(1-P_0)P_i^2 \sqrt{P_i}} = \frac{\Omega_i(1-P_i)}{(1-P_0)} \left( \frac{P_0}{P_i} \right)^{2.5}, \quad (12)$$

где  $P_i$  – измеренное или заданное значение пористости в долях единицы.

С учетом того, что  $P_0 = W_{vi} + P_i$  есть расчетная формула для полного потенциала, выражающая его зависимость от объемной влажности, основную гидрофизическую характеристику можно записать в виде:

$$\Psi = \Psi' + \Psi'' = \frac{\Omega_0 \sigma_{lg} (1 - P_0)}{\rho_w P_0^{2.5}} \cdot \frac{(P_0 - W_{vi})^{2.5}}{1 - (P_0 - W_{vi})} + \frac{A \Omega_0^3}{\rho_w W_{vi}^3}. \quad (13)$$

Первый член уравнения (13) отражает влияние капиллярной составляющей потенциала, второй – пленочной. Переход от капиллярно-пленочной формы влаги к капиллярной определяется уравнением А.Д. Воронина [3]:

$$\lg \Psi = 2.18 + \frac{\rho_s w_v}{\rho_v - \rho_s w_v}. \quad (14)$$

Поэтому при влажности, большой, чем определяемая по уравнению (14), второй член в уравнении (13) равен нулю,

Потенциал влаги обычно выражается через эквивалентное давление

$$p = p' + p'' = \frac{\Omega_0 \sigma_{ed} (1 - P_0)}{P_0^{2.5}} \cdot \frac{(P_0 - W_{vi})^{2.5}}{1 - (P_0 - W_{vi})} + \frac{A \Omega_0^3}{W_{vi}^3}. \quad (15)$$

Интегрируя это выражение по объемной влажности, получим

$$\int_a^p p \, dW = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_{ed} A \Omega_0^3}{p^2 a^2} (p^2 - a^2) + \frac{2 \sigma_{ed} \Omega_0 (p - 1)}{p^{2.5}} \times \\ \times \left( \frac{(p - a)^{2.5}}{5} + \frac{(p - a)^{1.5}}{3} + (p - a)^{0.5} - \operatorname{arcth}(p - a)^{0.5} \right). \quad (16)$$

Нижний предел интегрирования ( $W = a$ ) отвечает значению влажности в момент взятия образца.

Для сравнения образцов, взятых при различной влажности, значения  $a$  выбирается соответствующим влажности «устойчивого завядания». По своей физической сущности физическая величина интеграла выражает удельную объемную энергию Гиббса конденсированной фазы  $E$ , Дж/м<sup>3</sup>.

Почвогрунты представляют собой дисперсную систему с сильно развитой поверхностью. Их подвижные отдельные удерживаются между собой благодаря молекулярным силам взаимодействия между твердыми частицами и жидкостью. Поэтому физико-механические свойства, такие, как твердость, пластичность и т. д., зависят от количества содержащейся в нем влаги для каждого конкретного почвогрунта. При разрыхлении или уплотнении почвогрунта мы, с точки зрения термодинамики, совершаем над ним работу, которая идет на изменение энергии связей между подвижными отдельностями почвогрунта. Измерив разность энергии связи, после механического воздействия и до воздействия, мы получаем значения работы, совершенной над системой. Эта работа характеризует степень воздействия на почвогрунт и позволяет оценить как энергетическое состояние почвогрунта, так и эффективность механического воздействия на него.

Если до воздействия величина интеграла составляла  $E_0$ , а после него –  $E$ , то разность  $\Delta E = E - E_0$  покажет изменение удельной свободной энергии Гиббса. А отношение  $\Delta E/E$  можно использовать как показатель степени воздействия на почвогрунт.

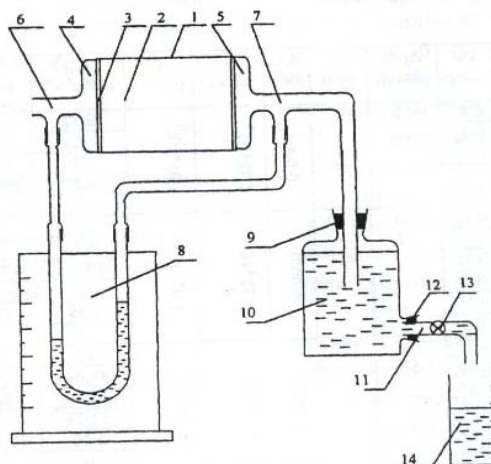


Рис. 2. Принципиальная схема устройства

Таким образом, мы получили возможность количественно оценить механические воздействия того или иного обрабатывающего орудия.

Величина  $E_0$  может быть использована для объективной оценки качества почвы сельскохозяйственного назначения. Принимая значение  $E_0$  для наиболее плодородной почвы (чернозема) за эталон и измеряя значение той же величины для данной почвы, можно оценить ее качество относительно эталона объективно и однозначно.

### Методика измерений и оборудование

Первичные измеряемые величины определяются экспериментально при помощи разработанного нами устройства. На рис. 2 показана принципиальная схема устройства.

Устройство состоит из кассеты 1, содержащей образец почвогрунта 2 между крупнопористыми мембранами 3. Кассета 1 соединена с торцов с входной 4 и выходной 5 предкамерами, к которым присоединены патрубки 6 и 7 одинакового поперечного сечения, к которым, в свою очередь, подсоединены колена U-образного манометра 8. Патрубок 7 через уплотнительную пробку 9 введен в заполненный водой аспиратор 10 с нижним выходным отверстием 11, снабженным герметизирующей прокладкой 12 и сливным краном 13. Для измерения объема вытекающей жидкости под краном 13 установлен мерный цилиндр 14.

Способ и устройство реализованы следующим образом. Собранное устройство приводится в действие открытием крана 13. При этом расход жидкости остается постоянным, пока уровень жидкости в аспираторе 10 выше нижнего среза патрубка 7. Скорость вытекания жидкости регулируется разностью уровней между нижними срезами патрубка 7 и крана 13, а также степенью открытости крана 13.

После установления постоянной разности уровней в коленах манометра 8 под кран 13 устанавливают мерный цилиндр 14 и измеряют время вытекания определенного объема жидкости, равного объему воздуха, протекшего через образец. Из эксперимента определяют разность уровней в коленах манометра,

объем газа, протекающего через образец, время протекания. Предварительно измеряют пористость влажного образца, например, способом по а. с. СССР № 1260763 А1, М.кл. G 01 N 15/08, и влажность образца методом сушки.

Полученные данные подставляют в формулу для определения удельной поверхности твердой фазы

$$\Omega_0 = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi}{\eta^3} \cdot \frac{(P_w + W_v)^2 \cdot R_s^3 \cdot \sqrt{P_w + W_v \Delta p \Delta t}}{\Delta x \Delta V}. \quad (17)$$

Для определения удельной поверхности конденсированной фазы используется следующая формула:

$$\Omega_{cf} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi}{\eta''} \cdot \frac{R_s^3 \cdot P_w^2 \cdot \sqrt{P_w \cdot \Delta p \Delta t}}{\Delta x \Delta V}, \quad (18)$$

где  $\eta''$  – удельная поверхность твердой фазы,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ;  $P_w$  – пористость влажного образца в долях единицы;  $W_v$  – объемная влажность образца в долях единицы;  $\Delta p$  – перепад давления между торцами образца, Па;  $R$  – радиус образца, м;  $\Delta t$  – время протекания измеренного объема, с;  $\Delta V$  – объем газа, прошедшего через образец,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta x$  – длина образца, м;  $\Omega_{cf}$  – удельная поверхность конденсированной фазы,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ .

### Результаты

Примеры реализации способа приведены в табл. 1–4.

Табл. 1

Гидрофизические параметры для исследуемых типов почв

a)

Материалы	$W_v$	$P_w$	$\Delta p \Delta t$ , Па с	$\Delta x$ , мм	$\Delta V$ , $\text{м}^3$
песок аллювиальный	00	045	90.23	100	0.0001
	01	035			
	02	025			
	03	015			
	045	00			
темно-серая лесная песчаная	00	052	1183.35	100	0.0001
	01	042			
	02	032			
	03	022			
	04	012			
	052	00			
чернозем выщелоченный	00	055	1316.52	100	0.0001
	01	045			
	02	035			
	03	025			
	04	015			
	055	00			

б)

Материалы	$\eta' \cdot 10^{-5}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\eta'' \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\Omega_{cf} \cdot 10^6$ , м/м <sup>3</sup>	$\Psi$ , Дж/кг
песок аллювиальный	1.72	1.05	3.32	—
			1.77	111.23
			0.76	41.11
			0.21	10.12
			0	—
темно-серая лесная песчаная	1.72	1.05	62.5	—
			36.64	2235.0
			18.56	972.0
			7.27	331.4
			1.59	65.57
			0	—
чернозем выщелоченный	1.72	1.05	80	—
			48.44	3149.2
			25.84	1338.1
			11.14	497.56
			3.10	124.1
			0	—

Табл. 2

Вспашка под однолетние травы после однолетних трав

Орудие	Средняя удельная поверх- ность, м <sup>2</sup> /см <sup>3</sup>	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		Пористость		Удельная энергия, кДж/м <sup>3</sup>		$\Delta E/E_0$
		до	по- сле	до	по- сле	до	после	
Т-25Н+ экспер.плуг	117	1.24	1.14	0.581	0.62	287	315	0.09
ДТ-75Н+ ПЛН-4-35			1.21		0.59		293	0.02
Т-25Н+э кспер.плуг	127	1.30	1.16	0.562	0.619	271	316	0.17
ДТ-75Н+ ПЛН-4-35			1.19		0.607		307	0.13
Т-25Н+ экспер.плуг	142	1.34	1.15	0.573	0.641	338	397	0.17
ДТ-75Н+ ПЛН-4-35			1.17		0.621		381	0.125

На первом поле: объемная влажность на поле 0.23, плотность тв фазы 2.41 кг/м<sup>3</sup>.На втором поле: объемная влажность на поле 0.22, плотность тв фазы 2.47 кг/м<sup>3</sup>.На третьем поле: объемная влажность на поле 0.22, плотность тв фазы 2.52 кг/м<sup>3</sup>.

Из данных таблиц следует, что на всех полях агрегат Т-25Н+экспер.плуг более эффективен. Преимущество этого агрегата более выражено для почв с меньшей удельной поверхностью.

Табл. 3

## Боронование под пшеницу и ячмень

Орудие	Средняя удельная поверх- ность, м <sup>2</sup> /см <sup>3</sup>	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		Пористость		Удельная энергия, кДж/м <sup>3</sup>		$\Delta E/E_0$
		до	после	до	по- сле	до	после	
Т25+эксп. аф- ронтальн. игольч. борона	105	1.46	1.33	0.55	0.60	219	254	0.16
Т25+эксп. фронтальн. игольч. борона			1.23		0.63		276	0.26
ДТ-75Н+ БИГ-3			1.38		0.58		243	0.11
ДТ-75Н+ БЗТС-1,0			1.39		0.58		241	0.10
Т25+эксп. афронтальн. игольч. борона	131	1.49	1.28	0.58	0.63	310	350	0.13
Т25+эксп. фронтальн. игольч. борона			1.26		0.70		392	0.26
ДТ-75Н+ БИГ-3			1.35		0.58		311	0.003
ДТ-75Н+ БЗТС-1,0			1.36		0.58		315	0.016

На первом поле: объемная влажность на поле 0.29, плотность тв. фазы 2.63 кг/м<sup>3</sup>.

На втором поле: объемная влажность на поле 0.31, плотность тв. фазы 2.51 кг/м<sup>3</sup>.

Из табл. 3 следует, что из экспериментальных борон наиболее эффективна фронтальная игольчатая борона на всех полях. Из серийных агрегатов более эффективен агрегат ДТ-75Н+БЗТС-1,0.

Табл. 4

Прикатывание после сева гороха (МТЗ-82+КЗК-10), Культивация с выравниванием и прикатыванием (ДТ-75Н+РВК-3,6)

Орудие	Средняя удельная поверх- ность, м <sup>2</sup> /см <sup>3</sup>	Объемная масса, кг/м <sup>3</sup>		Пористость		Удельная энергия, кДж/м <sup>3</sup>		$\Delta E/E_0$
		до	по- сле	до	по- сле	до	по- сле	
МТЗ-82+КЗК-10	106	1.226	1.397	0.55	0.48	215	165	-0.23
ДТ-75Н+РВК-3,6	112	1.42	1.40	0.49	0.49	144	150	0.04

На первом поле: объемная влажность на поле 0.11, плотность тв. фазы 2.46 кг/м<sup>3</sup>.

На втором поле: объемная влажность на поле 0.16, плотность тв. фазы 2.45 кг/м<sup>3</sup>.

Из данных таблицы следует, что агрегат МТЗ-82+КЗК-10 уплотняет почву, а агрегат ДТ-75Н+РВК-3,6 прикатывает почву без уплотнения.



### Summary

*V.V. Sirotkin, V.M. Sirotkin. Energetic Estimation of Soil Condition and Degree of Mechanical Influence on It by Soil-Cultivating Machines.*

Method of estimating the energy condition of soil and degree of mechanical influence on it by soil-cultivating machines is developed on the basis of a uniform integrated parameter. The latter is determined by experimental and calculate means on the basis of measuring standard values, such as firm phase specific surface, condensed phase specific surface, moisture conductivity coefficient, porosity, humidity, soil moisture potential.

**Key words:** firm phase specific surface, condensed phase specific surface, moisture conductivity coefficient, porosity, humidity, soil moisture potential.

### Литература

1. *Сироткин В.В., Сироткин В.М.* Прикладная гидрофизика почв. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2001. – 250 с.
2. *Мичурин Б.Н.* Энергетика почвенной влаги. – Л.: Гидрометеоиздат., 1975. – 137 с.
3. *Воронин А.Д.* Энергетическая концепция физического состояния почв // Почвоведение. – 1990. – № 5. – С. 7–19.

Поступила в редакцию  
22.04.08

---

**Сироткин Вячеслав Владимирович** – доктор географических наук, профессор кафедры ландшафтной экологии Казанского государственного университета.  
E-mail: [Sirotkin67@rambler.ru](mailto:Sirotkin67@rambler.ru)

**Сироткин Владимир Михайлович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики Чувашской государственной сельскохозяйственной академии, г. Чебоксары.